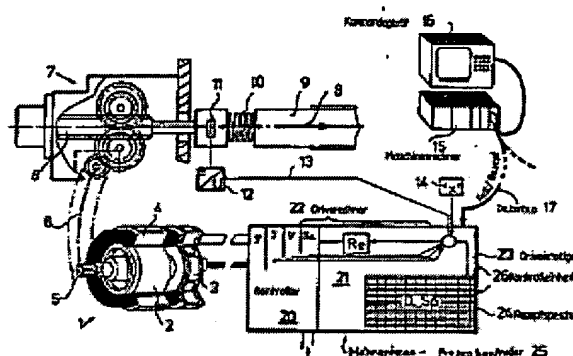


## Multiple motor drive control

**Patent number:** DE4429304  
**Publication date:** 1995-06-14  
**Inventor:** STILLHARD BRUNO (CH); SIEGRIST RONALD (CH);  
 BLOECHLINGER HUGO (CH)  
**Applicant:** PROCONTROL AG (CH)  
**Classification:**  
 - international: B29C45/76  
 - european:  
**Application number:** DE19944429304 19940322  
**Priority number(s):** CH19940000353 19940208; DE19944409823 19940322

### Abstract of DE4429304

The drive control for axes with an electro-motor drive, for a number of control values, has a separate multi-value control (25) which can be brought to the assembly independent of the machine computer (15, 16), for an autonomous control of the control values. Apart from the signal computer (20) of the superior process control (22), it gives a selective control of the control values, without delay. It takes the required data from a memory (24) at the multiple value control (25). A multi-axis drive module has a process computer (22) as well as several signal computers (20), to give a simultaneous control of a number of axes, without delay. The multiple value control (25) is a cascade control. An interface gives a link to a data bus (17) or a direct connection to the machine computer (15, 16). Several operating phases with different nominal values, are set at the multiple value control (25). On a minor control deviation, the setting signal has a linear function and, on a major deviation, a root function of the control deviation. The electro-motor drive (1) is a permanently energised servo motor, an induction motor with vector control, a controlled DC motor, a brushless DC motor or a switched reluctance motor. The process computer (22) is structured to operate with three or more axes. With assemblies of four axes, or more, two or more modules are used co-ordinated by starting and running programs, where one module carries the overriding programs. A safety threshold band, for at least some values, is incorporated in a module, and its process computer (22) is part of the sequence or program for monitoring.







DEUTSCHES  
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 44 29 304.6-51  
22 Anmeldetag: 22. 3. 94  
43 Offenlegungstag: —  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 14. 6. 95

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

30 Unionspriorität: 32 33 31  
09.02.94 CH 00353/94

73 Patentinhaber:  
ProControl AG, Flawil, CH

74 Vertreter:  
von Samson-Himmelstjerna, F., Dipl.-Phys.; Turi, M.,  
Dipl.-Phys., Pat.-Anwälte, 80538 München

62 Teil aus: P 44 09 823.5

72 Erfinder:  
Stülhard, Bruno, St. Gallen, CH; Siegrist, Ronald,  
Oberuzwil, CH; Blöchliger, Hugo, Flawil, CH

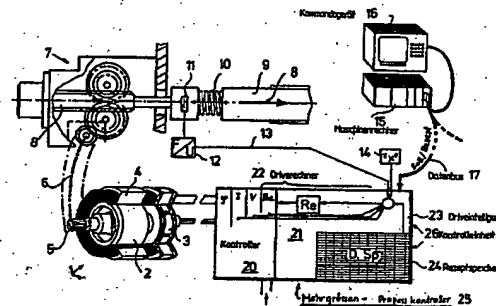
68 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 43 14 722 A1  
US 52 51 146  
US 48 26 418  
US 48 05 112  
EP 03 82 857 A1  
EP 03 63 498 A1  
EP 03 31 733 A1  
EP 02 73 979 A1  
EP 02 24 589 A1

54 Regelantrieb für mehrere Regelgrößen

57 Die neue Erfindung schlägt vor, einen Regelantrieb als Mehrgrößen-Regler (26) auszubilden. Er weist dafür eine Kontrolleinheit (26), bestehend aus einer Driveintelligenz (23) mit einem Prozessor (22) sowie einem Arbeitsspeicher (24) für Rezepte bzw. Programme auf. Es wird entweder die Geschwindigkeit oder der Stromeingang an einen Elektromotor (1) gewählt. Je nach Bedarf können z. B. eine Kraft, eine Geschwindigkeit oder ein Weg über der Zeit als Zielgrößen von einem übergeordneten Maschinenrechner (15, 16) an dem Arbeitsspeicher (24) übergeben werden, der nun die entsprechenden Werte als Regelgrößen (oder Auslegungsgrenzwerte) vorgibt, zur größtmöglichen Annäherung an Zielgrößen-Sollwerte.

Es wird ferner ein neuartiger Mehrachsdrive (30) für die Bildung eines Moduls von wenigstens zwei, insbesondere für drei oder mehrere Achsen mit entsprechenden Antriebskontrollern (20) mit einer Schnittstelle für ein Datenübertragungssystem und/oder den Maschinenrechner (15, 16). Der Arbeitsablauf kann in dem Maschinenrechner (15, 16) definiert und als entsprechende Sollwerte vorgegeben werden. Diese werden direkt oder über das Datenübertragungssystem dem Rezeptspeicher (24) des Prozessrechners (22) zugeführt, welche mehrere Achsen als Mehrgrößen-Regler überwacht und gleichzeitig koordiniert steuert und/oder regelt.



DE 44 29 304 C 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen Regelantrieb nach dem Oberbegriff von Anspruch 1 sowie die Verwendung desselben.

Die Regelungstechnik hat in den zwei vergangenen Jahrzehnten eine enorme Wandlung erfahren. Lange wurde die Closed-Loop-Regelung als höhere Stufe gegenüber einer einfachen Steuerung eingeschätzt. Die bloße Steuertechnik setzt normalerweise bessere Kenntnisse des Arbeits-Prozesses voraus, wenn höchste Qualitäten erreicht werden sollen. Eine Regelung wird vielfach dann eingesetzt, wenn die Prozeß-Einflußparameter nicht genügend oder nicht alle bekannt sind. Bis weit in die 80er Jahre galt sozusagen als höchste Entwicklungsstufe die Verwendung eines Prozeßrechners. Gestützt auf die Signale von Sensoren an der Verarbeitungsmaschine oder von meßtechnisch erfaßten Produktparametern, wurden alle Hauptfunktionen von dem Prozeßrechner zentral koordiniert und gesteuert bzw. geregelt. Dieses Model wurde in der Folge abgelöst durch die sogenannten speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), welchen jedoch für aufwendigere Rechenaufgaben ein Mikroprozessor zugeordnet wurde. Dabei wurde der SPS die Steuer- und Verriegelungsfunktionen, teils aber auch Startprogramme, Anlaufprogramme usw. zugeordnet. Der Mikroprozessor übernahm einen Teil der Prozeßregelung.

Seit einiger Zeit haben Servomotoren bei vielen Verarbeitungsmaschinen, z. B. auch bei Spritzgießmaschinen, eine immer größere Verbreitung gefunden. Die motorisch erzeugte Drehbewegung wird dabei als solche übersetzt und nach Bedarf in eine translatorische Bewegung umgesetzt. Mit Servomotoren können mit überraschend hoher Genauigkeit, über die Kontrolle des elektrischen Feldes ( $\phi$ ) sowie die Stromregelung (I), bzw. einer entsprechenden Momentregelung für die Motorachse, sowohl die Position wie die Geschwindigkeit der Achse von einem Interpolator nach vorgegebenen Sollwerten beherrscht werden. Eine Maschinensteuerung weist ihren Einsatz auf die ganze Maschine verteilt. Die zusammenwirkenden Steuer- und Regelvorrichtungen — nachfolgend als Drives bezeichnet — können eine Gruppe bilden. Von dem Interpolator findet über die dazu benötigte Verdrahtung zu jedem Drive, entweder eine frequenzielle oder eine analoge Datenübertragung statt. Signale werden bei der Analogübertragung in Form einer Spannung mit einem Wert im Bereich von plus-minus 10 Volt übertragen. Der Nachteil dieser Lösung liegt darin, daß die Datenübertragung an sich einen Problemkreis darstellt. Die Signalleitungen, insbesondere für die Regelaufgaben müssen speziell gegen Störfelder geschützt werden. Es können die sehr vorteilhaften Bussysteme nicht oder nur sehr beschränkt eingesetzt werden, da die Geschwindigkeit der Datenübertragung mit dem Bussystem nicht mehr gewährleistet ist. Die Integration des Interpolators in die CNC-Steuerung ist zur Zeit die optimalste Lösung, wobei festgestellt wird, daß die Systeme als Ganzes bis an ihre Leistungsgrenze ausgeschöpft sind. Eine weitere Erhöhung der Beherrschbarkeit des Prozesses könnte nur mit unverhältnismäßigem Einsatz erreicht werden.

Regelantriebe der eingangs genannten Art sind beispielsweise aus den nachfolgenden Druckschriften bekannt: EP 331 733; DE 43 14 722; EP 273 979; EP 224 589; EP 382 857; EP 363 498; US 4,805,112; US 4,826,418 und US 5,251,146.

Diese Beispiele zeigen alle Regelantriebe, vorwiegend für Spritzgießmaschinen, mit einer oder mehreren elektromotorisch angetriebenen Achse/n. Den Regelantrieben liegt dabei ein gemeinsames Prinzip zugrunde: Sie enthalten eine zentrale Recheneinheit, von der aus alle Steuer- bzw. Regelbefehle für die zu beeinflussenden Achsen abgesendet sowie die gesamte Datenmenge an Meßwerten der Regelgrößen empfangen werden. Daher haben diese bekannten Regelantriebe den zuvor erwähnten Nachteil.

Der Erfindung wurde nun die Aufgabe gestellt, den Arbeitsablauf von Maschinen oder Verarbeitungsmaschinen über Regelantriebe in noch höherem Grad zu beherrschen, so daß je nach Einsatz, eine wesentliche Leistungssteigerung und/oder eine Steigerung der Reproduzierbarkeit und/oder der Qualität möglich werden. Die Erfindung löst diese Aufgabe durch die Gegenstände der Ansprüche 1 und 12.

Der erfindungsgemäße Regelantrieb weist eine Kontrolleinheit bestehend aus einer Driveintelligenz mit dem Prozeßrechner sowie dem Speicher oder Arbeitsspeicher für Rezepte oder Programme auf, welche zur Regelung von wenigstens zwei Achsen ausgelegt ist.

Von den Erfindern ist erkannt worden, daß man für die jüngste Entwicklung auf falschen Annahmen basierte. Sehr anschaulich kann dies an dem Model der Raumbewegung eines Krans oder eines Roboters verständlich gemacht werden. Der Roboter greifer bewegt sich üblicherweise in allen drei Raumrichtungen. Der bisherige Ansatz lag darin, daß die resultierende Bewegung des Greifers von dem Roboter dann beherrscht wird, wenn jede Teilbewegung in jeder der drei Raumrichtungen (bei drei Achsen) beherrscht wird. Der Rechner müßte nur schnell genug sein, und die Befehle an jeden Drive richtig gegeben werden. Vorausgesetzt, daß die Berechnung der Raumkurve genau genug war, nahm man an, daß das Resultat sozusagen zu 100% stimmen müßte. In der Praxis ist dies aber leider nicht der Fall. Es treten bekanntlich variierende Massenträgheiten, Reibkräfte und andere Widerstände usw. auf, welche man mit extrem großen Fehlerkorrekturprogrammen auszuschalten versucht. Dies aber oft mit nur teilweisem Erfolg.

Der erste Fehlsatz lag darin, daß das Problem dreidimensional betrachtet und dann einfach in die drei Dimensionen zerlegt bzw. reduziert wurde. Tatsächlich aber ist das Problem mehr als dreidimensional, da sich zum Beispiel die Zeit über Geschwindigkeitsänderungen so auswirkt wie wenn eine 4. Dimension vorhanden wäre. Damit aber ist der mathematische Ansatz, nur auf den drei Raumdimensionen aufbauend, falsch. Der zweite Fehlsatz lag darin, daß der Faktor der gegenseitigen Beeinflussung der drei Raumbewegungen sehr groß ist, wenn Reibung, wechselnde Trägheitskräfte, variierende Geschwindigkeiten usw. vorhanden sind. Auch der beste mathematische Ansatz kann letztlich nur eine grobe Näherung sein. Jede Beherrschung eines Arbeitsprozesses wird in dem Mikrobereich ( $\mu$  sec/ $\mu$  mm usw.) über eine starre Steuerlogik oder Regellogik unmöglich, wenn nichtlogische Funktionen großen Einfluß haben. Die dritte, möglicherweise gravierendste Fehlannahme lag

darin, daß die Leistungsfähigkeit bzw. die Verarbeitungsgeschwindigkeit von Prozeßrechnern und die Signalübertragung in Datenübertragungssystemen mit Lichtgeschwindigkeit, als so groß angenommen wurde, daß es gar keine Rolle mehr spielt, an welcher Stelle in einem System die Datenverarbeitung geschieht. Man ging von einer beinahe Gleichzeitigkeit aus. Viele Praxisfälle zeigten, daß alle komplexen Informationsübertragungssysteme relativ große Zeitspannen bis zu Sekunden von der ersten Signal-Auslösung bis zur Durchführung eines Befehls brauchen. Bedingt ist dies z. B. durch die vielen Schnittstellen, und Umformungen aber auch durch Übertragungssicherungen, durch Sicherheitssysteme mit Auftrags- und Meldebestätigungen. Bei komplexeren Systemen müßten oft mehrere Rechenaufgabe gleichzeitig gelöst werden. Die Summierung selbst kleinster Zeitverzögerungen ergibt ein träges System, das sich für Regelfunktionen schlecht eignet. Der eigentliche Fehler liegt darin, daß die innere Regelungstechnik des Servo-Regel-Antriebes getrennt bearbeitet wurde von der eigentlichen Prozeßregelung bzw. Arbeitsprozeßsteuerung.

Die Erfinder haben ferner erkannt, daß die Lösung nur darin bestehen kann, daß der Korrektureingriff für die Prozeßsteuerung oder -regelung möglichst an dem Ort des Geschehens und dort möglichst schnell durchgeführt wird. Es muß ein unmittelbares Zusammenwirken vor Ort, nämlich in dem Drive von jeder Steuer- und Regelfunktion erfolgen. Wird den Drives eine gemeinsame Kontrolleinheit bzw. ein gemeinsamer Prozeßrechner unmittelbar zugeordnet so kann mit nahezu Gleichzeitigkeit die Feldkontrolle sowie Strom-, Lage- sowie Geschwindigkeitsregelung aller Drives koordiniert werden. Dem Gedanken einer gemeinsamen Kontrolleinheit kommt der spezifische Aufbau der an sich bekannten Driverrechner entgegen. Diese Drive weisen bereits einen internen  $\phi$ -Kontroller sowie je einen I-, V- und Positionsregler auf. Diese erlauben selbst bei stark wechselnden Kräften in der Maschine z. B. eine Positionierung über der Zeit mit extrem hoher Genauigkeit. Die Kontrolleinheit kann als Interpolator nahezu ohne Zeitverlust z. B. die Positionsregler für zwei oder drei Achsen koordinieren. Dazu besitzt die Kontrolleinheit mit der Driveintelligenz die erforderliche Rechnerleistung. Der Kontrolleinheit sind alle unmittelbar benötigten Werte als ganze Rezepte oder Programme vor Ort verfügbar. Damit entsteht im Rahmen eines vorgegebenen Rezeptes eines Funktionseinheit, die als ein echter, hoch sensibler Regler auch für zwei Achsen arbeiten kann. Das Kommunikationssystem wird nicht mehr belastet, umgekehrt verzögert das Kommunikationssystem die Prozeßregelung nicht mehr. Die Synchronisation von zwei oder mehr geregelten Achsen kann auch diese Weise mit einem bisher nicht erreichten Grad an Vollkommenheit sichergestellt werden. Die Erfindung erlaubt eine echte und gleichzeitige Zusammenarbeit für alle Achsen, da hierzu die räumliche Distanz und eine nachteilige Datenübertragung über einen Bus für die eigentliche Regelfunktion entfällt. Vorteilhafterweise wird der Mehrfachdrive als Baueinheit mit integriertem Programmspeicher und Driverrechner mit vorzugsweise digitaler Signalverarbeitung zur mehrachsigen Synchronisation von Bewegungs- und/oder Bahnkurven für eine elektrisch, über mehrere Servo-Motoren angetriebene Maschine, verwendet.

Im Stand der Technik wurde der Prozeßrechner als selbstständiges Hirn benutzt, der über die notwendige Anzahl Sensoren den Prozeß lenkte. Bei Servomotoren können nun z. B. der Lage-Ist-Wert und der Geschwindigkeits-Ist-Wert direkt aus dem Signalrechner entnommen werden. Prozeßrechner und Signalrechner arbeiten gemäß der neuen Erfindung gestützt auf die ihnen zugeteilten Rezepte als geschlossene Funktionseinheit als ein intelligenter "Vor-Ort-Regler". Wie in der Folge gezeigt wird, erlaubt die neue Erfindung wahlweise die je momentan benötigten Parameter, sei es zu steuern oder regeln, besonders auch im Closed-Loop zu regeln, z. B. für die Bewegung von einem Roboter oder einem Kranhaken.

Nach der Erfindung ist der Prozeßrechner als eine Funktionseinheit als Mehrgrößen-Prozeß-Kontroller bzw. Mehrgrößen-Regler ausgebildet, dem als Zielgrößen Grenzwerte von Regelgrößen (z. B. Kraft und/oder Geschwindigkeit und/oder Weg) eingebbar sind, zur größtmöglichen Annäherung an Zielgrößen-Sollwerte. Bis heute besteht in vielen Verarbeitungsprozessen wie z. B. beim Spritzgießen ein Streit. Welche von den physikalischen Parametern sollen, und wie müssen sie beherrscht werden, über eine

- Maschinenparameter-Steuerung, oder eine
- Maschinenparameter-Regelung; über eine
- Prozeß(parameter)-Steuerung oder eine
- Prozeß(parameter)-Regelung; und/oder eine
- Produkteigenschaft-Regelung.

Der neue Mehrgrößen-Regler beantwortet alle diese Fragen optimal. Von den Erfindern ist erkannt worden, daß in der Praxis für die Beherrschung des Arbeitsprozesses sehr selten alle Parameter gleichzeitig einer möglichst vollkommenen starren Regelung unterworfen werden müssen. Sehr häufig besteht nämlich die Aufgabe darin, schnell von einem Punkt 0 nach Punkt B zu gelangen, wobei jedoch z. B. eine bestimmte Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung, eine bestimmte Kraft und eine bestimmte Wegmarke nicht überschritten werden dürfen. In einer ersten Phase wird häufig die Geschwindigkeit bzw. die Beschleunigung, die kritische und tatsächlich zu regelnde Größe sein. Ergibt sich von dem Verarbeitungsprozeß eine Gegenkraft, so kann diese sich als kritische Größe ergeben, so daß z. B. die Geschwindigkeit reduziert oder gestoppt werden muß. Eine Regelung z. B. im Closed-Loop erfolgt dann allein auf eine bestimmte Kraft oder einen bestimmten Druck, z. B. mit einem Soll-Drehmoment-Verlauf. In einer Endphase, bei Annäherung an den Punkt B kann die Positionsregelung aktiv werden. Die jeweils nicht aktiven Regel-Parameter bleiben überwacht, werden regelungstechnisch abschnittsweise jedoch nicht beachtet. Die Erfindung erlaubt damit je nach momentaner Anforderung im Rahmen von Zielgrößen zu steuern oder zu regeln bzw. nicht zu steuern oder nicht zu regeln.

Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform ist der Mehrgrößen-Regler — mit vorzugsweise digitaler Signalverarbeitung (in Software) — kaskadenartig regel- bzw. begrenzbare. Es ist ohne weiteres möglich, daß mehrere Arbeits-Phasen mit unterschiedlichen Zielgrößen (z. B. Kraft oder Geschwindigkeit oder Weg) in dem Mehrgrößen-Kontroller festlegbar sind, welche vorzugsweise über das Geschwindigkeitssignal zu dem Drive regel- bzw. begrenzbare sind. Ganz besonders für zyklische Arbeitsprozesse, wie z. B. bei Schweißrobotern oder bei Druck-

und Spritzgießmaschinen oder in der Papier- oder Druckindustrie, können damit für je einen ganzen Arbeitszyklus alle erforderlichen und teils wechselnden Sollwerte in den Arbeitsspeicher gegeben werden, so daß auch Übergänge von einer Phase in eine andere innerhalb eines Zyklus ohne Totzeit bewältigbar sind. Gemäß einer weiteren Ausgestaltung ist als Stellgröße an den elektromotorischen Antrieb (Achse) der Geschwindigkeitseingang (V) oder der Stromeingang (I) wählbar, wobei die Ist-Geschwindigkeit und die Ist-Position aus dem Drive nehmbar bzw. berechenbar ist. In vielen Fällen können so mit einem Minimum an Sensoren in dem Bereich der Verarbeitungsmaschine optimale Ergebnisse erzielt werden. Gemäß einem weiteren Vorschlag werden in einem Großsignalbereich, d. h. bei großen Regelabweichungen, das Geschwindigkeits-Stellsignal zu dem Drive mit einer parabelartigen bzw. einer wurzelartigen Funktion der Druck-Soll-Ist-Abweichung und/oder die Weg-Soll-Ist-Abweichung vorzugsweise mit dem größtmöglichen Verstärkungsfaktor berechnet zur Annäherung an die größtmögliche Beschleunigung des Servomotors, besonders vorzugsweise im wesentlichen mit der Formel:

$$\begin{aligned} & -\sqrt{|(P_{soll} - P_{ist})|} \times k_p = \pm \text{Stg. (Stellgröße)} \text{ bzw.} \\ & -\sqrt{|(S_{soll} - S_{ist})|} \times k_s = \pm \text{Stg.} \end{aligned}$$

Vor allem im Großsignalbereich kann ferner der Verstärkungsfaktor K1 bzw. K2 (Fig. 8) unsymmetrisch sein; und/oder im Kleinst-Signalbereich, d. h. bei kleinen Regelabweichungen, kann zur Erreichung der Stabilität das Geschwindigkeits-Stellsignal zu dem Drive als lineare Funktion der Soll-Ist-Abweichung berechnet werden. In vielen Fällen kann als Stellgröße an dem elektrischen Antrieb der Geschwindigkeitseingang gewählt werden, wenn abtriebsseitig von dem elektromotorischen Antrieb wenigstens ein mechanisch, elastisches System mit Servomotor-Charakteristik, z. B. ein permanent erregter Servomotor oder ein vektoriell geregelter Asynchronmotor (z. B. Kurzschlußläufer), oder ein geregelter Gleichstrommotor verwendet werden. Ferner ist es auch möglich, AC- und DC-Servomotoren oder DC-brushless-Motoren oder sehr preisgünstige Reluctance-Motoren vorzugsweise Switched Reluctance-Motoren, einzusetzen. Gemäß einem weiteren sehr vorteilhaften Ausgestaltungsgedanken ist der Prozeßrechner für drei oder mehr Achsen ausgelegt; er weist eine Schnittstelle auf, zur Verbindung mit einem Datenübertragungssystem an einen Maschinenrechner, wobei der Arbeitsablauf vorzugsweise in dem Maschinen-Rechner definiert und die entsprechenden Werte, Sollwerte, Grenzwerte usw. als Rezepte bzw. Programme vorgebar und über das Datenübertragungssystem in den Arbeitsspeicher der Driveintelligenz des Prozeßrechners einlesbar sind. Das Datenübertragungssystem wird vorzugsweise als Datenbus, besonders vorzugsweise als Sensor/Actor-Businterface bzw. Can-Bus ausgebildet. Sehr vorteilhaft ist ferner, wenn zumindest für einzelne Werte ein Sicherheitsgrenzband bzw. ein Toleranzband von dem Maschinenrechner festgelegt und dem Prozeßrechner als Teil des Rezeptes bzw. des Programmes übermittelt wird, zur Steuerung bzw. Überwachung z. B. von speziellen Phasen. Dabei wird z. B. für einzelne Achsen bei Überschreitung des Toleranzbandes die Bewegung gestoppt und/oder umgekehrt. Auf diese Weise können nicht nur sehr vorteilhafte Sicherheitsfunktionen für die Maschinenteile sondern auch für die Produktqualitäten wirkungsvoll beherrscht werden. Bei sehr vielen Maschinen sind durch den Arbeitsprozeß gegebene Funktionsgruppen vorhanden. Es ist ohne weiteres möglich, unabhängig von der Funktionsgruppe alle Achsen durch eine einzige Groß-Kontrolleinheit zu koordinieren. Aus Gründen der Systemübersicht, der Störkontrolle und evtl. Standardisierung wird als besonders bevorzugte Lösung vorgeschlagen bei Arbeitsmaschinen, die mehr als 4 resp. 5 Achsen haben, zwei oder mehrere Kontrolleinheiten bzw. Module vorzusehen, wobei jedes Modul als Funktionsgruppe zwei oder drei Achsen koordiniert. Der Maschinenrechner kann als Rechner-Speicher, z. B. als kostengünstiger PC ausgebildet sein, und Grundprogramme bzw. Grundrezepte insbesondere als Startprogramme und Ablaufprogramme abrufbereit speichern. Das ganze System wird auf diese Weise als dezentrales offenes System modular ausgebildet. Damit können die einzelnen Hardware-Teile oder die Software selektiv den jeweiligen Neuentwicklungen angepaßt werden.

In der Folge wird die Erfindung nun an Hand einiger Ausführungsbeispiele dargestellt. Es zeigt  
 50 Fig. 1 schematisch die zentralen Funktionselemente für einen Mehrgrößen-Regler;  
 Fig. 2 ein Steuerkonzept für eine Mehrachs-Steuer- und Regelvorrichtung;  
 Fig. 3 eine Mehrachs-Feuer- und Regelvorrichtung für die räumliche Bewegung;  
 Fig. 4 eine räumliche Bewegungskurve 0-E;  
 Fig. 5 die Bewegung von einem Punkt 0 zu A und B in einer Ebene;  
 55 Fig. 6, 6a, 6b verschiedene Ausbaustufen eines linear-parabolischen Reglers;  
 Fig. 7 einen Vergleich der statischen Druck-Weg-Kennlinie mit linearem und nicht linearem Regler;  
 Fig. 8 ein Beispiel einer optimierten linear-parabolischen Funktion;  
 Fig. 9 schematisch ein vollständiges Steuerkonzept an Hand einer Spritzgießmaschine mit je einem Spritzmodul sowie einem Form-Modul.  
 60 In der Folge wird nun auf die Fig. 1 Bezug genommen. Ein Antriebsmotor 1 weist einen Rotor 2 mit Permanentmagnet sowie einem Positionssensor 3 auf. Der Stator 4 weist mehrere, meistens drei, Wicklungen sowie einen Inverter auf. Über ein Abtriebsritzel 5, das fest auf der Welle des Rotors 2 aufgebracht ist, wird über einen Übertrieb 6, welcher zum Beispiel ein Zahnriemen, bevorzugt jedoch ein Zahnradübertrieb ist, ein eigentliches Übersetzungsgetriebe 7 angetrieben. Das Übersetzungsgetriebe 7 formt die Rotationsbewegung des motorischen Antriebes in eine Linearbewegung um, welche direkt auf eine Zahnstange 8 aufgebracht wird. Die Zahnstange 8 ist kraftschlüssig verbunden mit der Arbeitswelle 9, so daß die entsprechende Rotationsbewegung des Rotors 2 unmittelbar in eine Linearbewegung 10 umgeformt wird und die vom Arbeitsprozeß verlangte Bewegung durchführt.

An Stelle des dargestellten Übertriebes 6 kann aber auch die Welle des Rotors 2 direkt mit einer Arbeitswelle verbunden werden. Für die Umsetzung der Drehbewegung in eine Linearbewegung kann zum Beispiel auch eine Kugelspindel dazwischen angeordnet werden. Zwischen der Zahnstange 8 sowie der Arbeitswelle 9 ist eine Feder 10 eingebaut. Die Feder 10 kann eine physikalische Druckfeder sein, oder eine entsprechende Elastizität des mechanischen Systems oder aber die Elastizität der herzustellenden Teile. Im Falle einer Spritzgießmaschine kann die flüssige Kunststoffmasse die Elastizität sein. Ein Kraft- oder Druckaufnehmer 11 stellt die momentane Kraft bzw. den Druck fest und gibt über einen Sensor bzw. Wandler 12 sowie eine Signalleitung 13 die entsprechende Information an einen Mehrgrößen-Prozeßkontroller bzw. -Regler 25. Der Mehrgrößen-Prozeßkontroller weist eine Kontrolleinheit 26 auf, bestehend aus einer Driveintelligenz 23 sowie einem Rezeptspeicher 24. Die Driveintelligenz 23 ist in direktem Arbeitsverbund mit einem Prozeß- bzw. Driverechner 22 der über einen Interpolator 21 sowie einem Kontroller 20 die Bewegung des Rotors 2 steuert bzw. regelt. Mit 14 resp. "X" sind ein oder mehrere Funktionsparameter als "Ist-Werte" von der Maschine, von dem Prozeß oder von dem Produkt symbolisiert, welche je nach Erfordernis als Steuer-Regel- oder Begrenzungsfunktion kontrolliert werden müssen. Die Rezepte resp. Programme werden über ein Kommandogerät 16 bzw. einem Maschinenrechner 15 sowie einem Datenbus 17 in den Datenspeicher 24 der Driveintelligenz 23 eingelesen.

In der Fig. 2 ist ein vorteilhaftes Grundschemata dargestellt, das die Hauptfunktionselemente für eine(n) Mehrachsdrive bzw. Mehrachsen-Steuer/Regelvorrichtung darstellt. Die Fig. 2 ist gleichzeitig auch ein entsprechender Ausschnitt aus der Fig. 1. Der Maschinenrechner 15 mit einem Rechner-Datenspeicher 19 ist über einen Bus bzw. einen Sensor/Actor-Bus 17 an den Mehrachsdrive 30 verbunden, welcher aus drei Signalrechnern bzw. Kontrollern 20 (20.2; 20.2; 20.3 usw.) und dem Driverechner 2 mit Rezeptspeicher 24 besteht. Der Driverechner 22 besteht aus dem Interpolator 21 und drei Positionsreglern Pos. M1, Pos. M2, Pos. M3, die als Funktionseinheit die bestmögliche und kürzestmögliche Koordinierung aller Positionsregler gewährleistet. Jeder Kontroller 20 weist je einen eigenen Geschwindigkeitsregler (V-Regler, V-1, V-2, V-3) sowie einen Stromregler (I-Regler, I1, I2, I3), der das Drehmoment regelt, sowie Feld-Kontroller ( $\phi$ -Kontrolle,  $\phi 1$ ,  $\phi 2$ ,  $\phi 3$ ) auf, und ist jeweils mit einer Achse resp. dem entsprechenden Motor M1, M2 resp. M3 verbunden. An dem Sensor/Actor-Bus 17 können auch alle notwendigen Signal- oder Steuerverbindungen der Maschine wie Schalter, Kontrollen, Sensoren, Hilfsmotoren usw. angeschlossen werden, z. B. gemäß Fig. 1. Die Hochgeschwindigkeitsverarbeitung für alle Regelaufgaben findet jedoch direkt in dem Mehrachsdrive 30 statt, und zwar auf Grund von Sollwerten, Grenzwerten, bzw. einem entsprechenden Rezept, und Toleranzwerten, die für jede spezifische Arbeit von dem Rechner-Datenspeicher 19 übermittelt werden.

In der Fig. 3 ist "hardwaremäßig" ein erfindungsgemäßer Mehrfachdrive bzw. Mehrachsdrive mit drei Achsen (M1, M2, M3) sehr vereinfacht dargestellt. Das Herzstück ist der Mehrachsdrive 30, der hier für die gleichzeitige, koordinierte Steuerung und Regelung von drei Achsen bzw. drei Motoren (M1, M2, M3) konzipiert ist. Die Datenübertragung kann über eine direkte Leitung 17' oder einen Datenbus 17, wie in der Fig. 1 resp. Fig. 2, erfolgen, je nach Ausbaugrad, resp. Komplexität der ganzen Steuerung. Die Visualisierung findet im Kommandogerät 16 z. B. einem PC der Maschinensteuerung resp. des Maschinenrechners 15 statt. Grundkomponenten, auf denen die neue Lösung aufgebaut ist, ist die Steuerverbindung (S1, S2, S3) mit dem jeweiligen Motor (M1, M2, M3) sowie die Rückmeldeverbindung (R1, R2, R3) über welche insbesondere die  $\phi$ -Kontrolle bzw. die Positions-Istwerte von jeder Achse rückgemeldet werden bzw. worüber die entsprechende interne Regelung stattfindet. Der Mehrfachdrive ist eine Motorsteuerung/Regelung für mehrere Achsen.

In der Folge wird nun auf die Fig. 4 Bezug genommen, welche eine Raumkurve CR-soll in den Koordinaten X-Y-Z darstellt. Eine Grundaufgabe besteht darin, von dem Startpunkt 0 genau über die Kurve CR-soll zu dem Punkt E mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit, allenfalls einen Geschwindigkeitsverlauf zu gelangen, z. B. mit den Greifern eines Roboters oder dem Haken eines Krans. Fig. 4 stellt damit den idealisierten Verlauf dar, wobei in genügend kurzen Teilschritten vorzugsweise im Millisekundenbereich jeweils für jede Koordinate bzw. jede entsprechende Achse M1, M2, M3 die zugehörigen neuen Bewegungsbefehle gegeben werden müssen.

Die Fig. 5 veranschaulicht zwei Teilschritte von 0 zu A und von A zu B, nur in einer Ebene X-Y. In der Fig. 5 werden verschiedene nichtlogische Parameter wie Reibung (Ri) schwingende Masse (M) angenommen. Bei dem Punkt A bewegt sich die Masse in Richtung Ri mit einer bestimmten Geschwindigkeit Vi und erreicht nicht die Position A sondern A'. Die Position A' ist aber außerhalb der Sollkurve 0-A-B, so daß bei A' ein korrigierter Bewegungsbefehl für die beiden Richtungen X und Y errechnet und übergeben werden muß.

Die Fig. 6 zeigt eine erfindungsgemäße, verbesserte Lageregelung, konkret für eine Spritzgießmaschine, dabei sind:

71: Positionskontroll-Funktionsbaustein

72: Unterlagerter Drive/Motor-Geschwindigkeitsregler

73: Mechanischer Integrator der Motordrehzahl zum Lage-Istwert

Mit der zeit- bzw. beschleunigungs- oder verzögerungsoptimierten Annäherung an den Zielpunkt, beinhaltet der PK-FUB auch die Vorgabe der maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte, als auch den Wert für die erlaubte und anzustrebende Verfahrensgeschwindigkeit, die nicht überschritten werden darf.

Die Fig. 6a zeigt eine optimierte Druckregelung, dabei bedeuten:

81: Positionskontroll-Funktionsbaustein

82: Unterlagerter Drive/Motor-Geschwindigkeitsregler

83: Mechanischer Integrator der Motordrehzahl zum Lage-Istwert

84: Statische Systemdruckverstärkung (bar/m)

Erfindungsgemäß zeigt sich, bzw. läßt sich heute unter gewissen Randbedingungen auch mathematisch belegen, daß bei der Druckregelung die Analogie gilt, falls man hingeht und das Sollwegsignal mit dem Soll-drucksignal und entsprechend die Istsignale vertauscht. Die Begründung liegt in der Tatsache, daß im statischen Fall ein unmittelbarer, linearer Zusammenhang zwischen Wegdifferenz und entsprechender Druckdifferenz

besteht. Bei einer 1000 kN IMM beträgt die statische Systemdruckverstärkung ca. 200 (bar/mm) im vorderen Bewegungsbereich und vermindert sich auf ca. 1/3 dieses Wertes im hinteren Bereich. Damit für die Lage- und Druckerstellung die gleichen Parameter verwendet werden können, muß die Druckdifferenz mit einem Skalierfaktor angepaßt werden (Kp).

Beispielsweise bei einem Spritzvorgang wird im allgemeinen Fall sowohl der Druck als auch die Geschwindigkeit vorgegeben. In der ersten Phase liegt die Priorität vielfach in der Geschwindigkeitskontrolle und später in der Druckvorgabe. Im weiteren muß in der Software des Einspritzkontrollers dafür gesorgt werden, daß die Endlagen nicht überfahren werden, das heißt, diese dürfen im Normalfall nicht berührt werden. Keinesfalls darf mit hoher Geschwindigkeit in die mechanischen Begrenzungen gefahren werden. Folgende Anforderungen stellen sich somit an den Spritzkontroller:

- Beherrschen der vorgegebenen (Maximal-) Beschleunigung und Verzögerung
- Beherrschen der (maximalen) Spritzgeschwindigkeit  $= F(s, t)$
- Beherrschen des (Maximal-) Spritzdruckes  $= f(s, t)$
- Beherrschen des (Minimal-/Maximal-) Weges  $\rightarrow$  maschinenotypisch.

Die Fig. 6b zeigt einen, auf noch eine höhere Stufe optimierten Spritzkontroller, dabei bedeuten:

- 91: Anpassung der Kraft-Druckregelverstärkung
- 92: Positions(überlauf)begrenzungen
- 93: Positionskontroll-Funktionsbaustein
- 94: Unterlagerter Drive/Motor-Geschwindigkeitsregler mit unterlagertem Stromregler
- 95: Mech. Integrator der Motordrehzahl zum Lageistwert
- 96: Statische Systemkraft-Druckverstärkung (bar/m)

- a: Maximalwegbegrenzung
- b: Minimalwegbegrenzung
- c: Sollbeschleunigung
- d: Sollverzögerung
- e: Sollspritzgeschwindigkeit  $= f(s, t)$

Der optimierte Spritzkontroller läßt sich für spezifische Aufgaben noch weiter verbessern. So kann vor allem im Groß-Signalbereich als weitere Optimierung die Verstärkung Kp. bzw. Kz unsymmetrisch ausgeführt werden, um von der höheren Winkelverzögerung unter Last Nutzen zu ziehen.

Gemäß Fig. 7 ergibt sich bei der Drucksprungantwort ein nahezu idealer linear-Verlauf der Ist-Geschwindigkeit. Die Fig. 7 zeigt zudem eine Gegenüberstellung der statischen Druck-Weg-Kennlinie. Dabei kommt sehr anschaulich zum Ausdruck, daß bei einem neuen, nicht-linearen Regler viel näher an die Auslegungsgrenzwerte heran gefahren werden kann.

Die Fig. 8 zeigt den Funktionsverlauf eines linear-parabolischen Reglers. Damit im Kleinsignalbereich die hohe Verstärkung nicht zu Instabilitäten führt, wurde die Parabel im Bereich nahe der Sollposition durch eine herkömmliche lineare Funktion ersetzt. Es zeigt sich, daß bei der Lageregelung im Großsignalbereich mit einer parabelförmigen Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Sollwegdifferenz eine (zeit)optimale Verfahrenfunktion erreicht werden kann. Mit anderen Worten wirken die Soll/Ist-Abweichungen beim neuen Regler vor allem parabelartig auf die Geschwindigkeits-Stellgröße ein und nicht nur linear, wie bei herkömmlichen Reglern.

Die Fig. 9 zeigt eine ganz besonders vorteilhafte Ausgestaltung einer Gesamtsteuerung wobei die Kommunikation über einen Feldbus 17 erfolgt. Alle Soll-Programme werden dabei in einem Rechner-Speicher zum Beispiel in einem PC 15 abgelegt und form- bzw. materialspezifisch für den jeweiligen Arbeitsauftrag bzw. der Herstellung einer bestimmten Anzahl gleicher Teile als Rezept zum Beispiel einer SPS überspielt und gegebenenfalls von dort aus über den Feldbus 17 zusammen mit allen übrigen Sensorsignalen koordiniert als Arbeitssignale abgegeben. In der Fig. 9 sind je zwei Mehrachsensdrives als Hardwareeinheit, als Modul 41 und Modul 42 zusammengefaßt. Das Modul 41 koordiniert für das Beispiel der Spritzgießmaschine die drei Achsen für Einspritzen (Translation), Plastifizieren (Rotation) sowie die Aggregatbewegung. Beim Modul 54 sind zwei Achsen aufgeführt: Formschluß sowie der Auswerfer (Kernzug). Andere Kombinationen sind auch möglich.

Zusammenfassend gestatten die erfindungsgemäßen Lösungen einfache, überschaubare und stabile Maschinensteuerungen zu konzipieren.

- aufbauend von der eigentlichen Führung und Überwachung des Arbeitsvorganges an sich,
- gemäß einem besonders vorteilhaften neuartigen Mehrgrößenregler werden insbesondere Grundparameter wie Kraft, Geschwindigkeit und Wegführung in einer bisher nicht möglichen Art beherrscht,
- insbesondere werden die unmittelbar zusammenwirkenden Achsfunktionen als Regel- und Steuer-Modul für mehrere Achsen zusammengefaßt.

Als Mehrgrößenregler wird vor allem, aber nicht ausschließlich, die Regelung einer Achse bzw. eines Antriebes aber auf mehrere Zielgrößen hin verstanden. Dem Mehrgrößenregler wird (bildlich gesprochen) eine räumliche Hüll-Begrenzungs-Haube, bestehend aus den drei genannten Grundparametern, für jeden spezifischen Arbeitsauftrag als Rezept vorgegeben. (Der klassische Regler ist demgegenüber gekennzeichnet durch eine strenge Koppelung von Soll- und Istwert, wobei er immer aktiv ist und tendiert, diese beiden zur Übereinstimmung zu bringen.) Der Mehrgrößenregler weicht hiervon teilweise grundsätzlich ab. Da wenigstens zwei oder drei Sollwerte oder entsprechende Grenzwerte als Zielgrößen vorgegeben werden, ist im Normalfall jeweils nur eine der Größen im klassischen Sinne geregelt bzw. begrenzt, während im entsprechenden Zeitpunkt die anderen Regler Teile inaktiv sind, jedoch die entsprechenden Werte überwachen. Konkret bedeutet dies, daß zum Beispiel bei Erreichen des maximalen vorgegebenen Druckes (z. B. 200 bar) die entsprechende Druckregelung das Regelkommando übernimmt, während die beiden anderen regelungstechnisch inaktiv sind. Das gleiche gilt je für die anderen Parameter. Damit aber läßt sich tatsächlich eine Optimierung aller Grundparameter (Druck/Kraft, Geschwindigkeit usw.) mit den entsprechenden elektrischen Antrieben erreichen. Zum Beispiel im



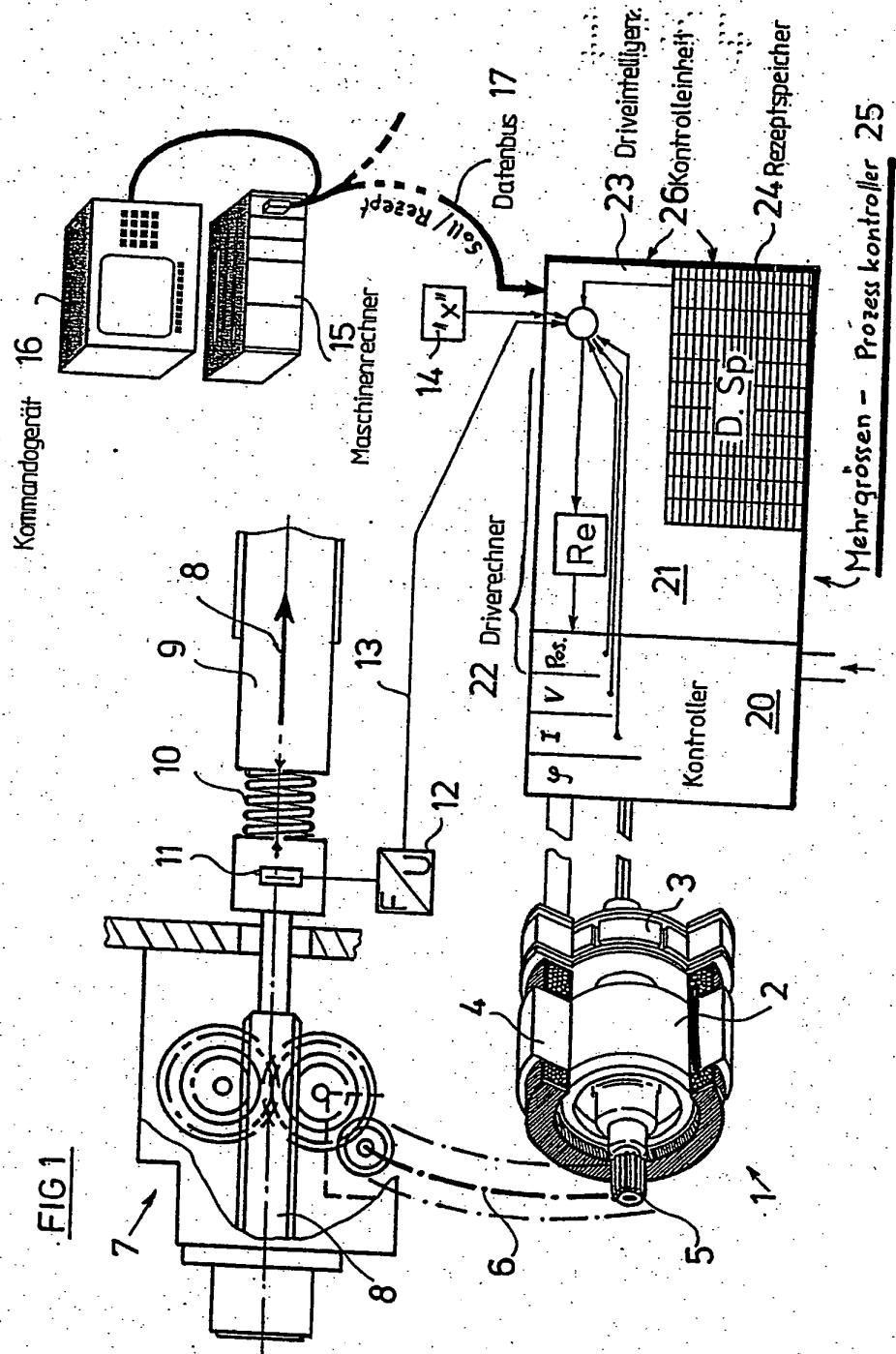
Fälle der Einspritzschneckenregelung einer Spritzgießmaschine wird für alle drei als Stellgröße ein Geschwindigkeitssignal für die Axialbewegung der Einspritzschnecke gewählt. Die Maschine als ganzes kann also sowohl z. B. den Spritzvorgang wie die Formschließung mit einer neuen, einheitlichen Steuerung bzw. Regelungsphilosophie geführt werden, was die Beherrschung des ganzen Prozeßablaufes erleichtert und insbesondere eine extrem große Flexibilität mit höchsten qualitativen Ergebnissen erlaubt. Die ganz besonders kritischen Phasen bzw. Bereiche des Prozesses können zudem mit einer bisher nicht erreichten Stabilität und Reproduzierbarkeit des Produktionsablaufes innerhalb einer sehr kurzen Gesamt-Zykluszeit geführt werden. Besonders vorteilhaft ist dabei die Kombination von Mehrgrößenregelung und Mehrachsdrive. Gemäß einer weiteren Ausgestaltung ist es ferner möglich, das Geschwindigkeitsstellsignal zu integrieren und als Wegstellsignal (evtl. in Form von Wegsignalen) zur Steuerelektronik (Drive mit integriertem Geschwindigkeits- und Lagerregler) gesandt wird.

Ganz besonders vorteilhaft kann die neue Erfindung besonders für die Linearbewegungen zumindest für einen Teil vorzugsweise für alle Achsen eines Roboters z. B. eines Schweißroboters oder eines Krans von der Driveintelligenz gesteuert bzw. koordiniert werden. Ferner bietet die neue Lösung bei Gieß- und Preßmaschinen generell, so bei Druckgieß-Spritzgieß- resp. bei Dixotrophen-Pressen und bei Textil- und Papierverarbeitungs- sowie Werkzeugmaschinen z. B. für Holz, Stein oder Metall, eine Verbesserung in Bezug auf die Beherrschung des Arbeitsprozesses.

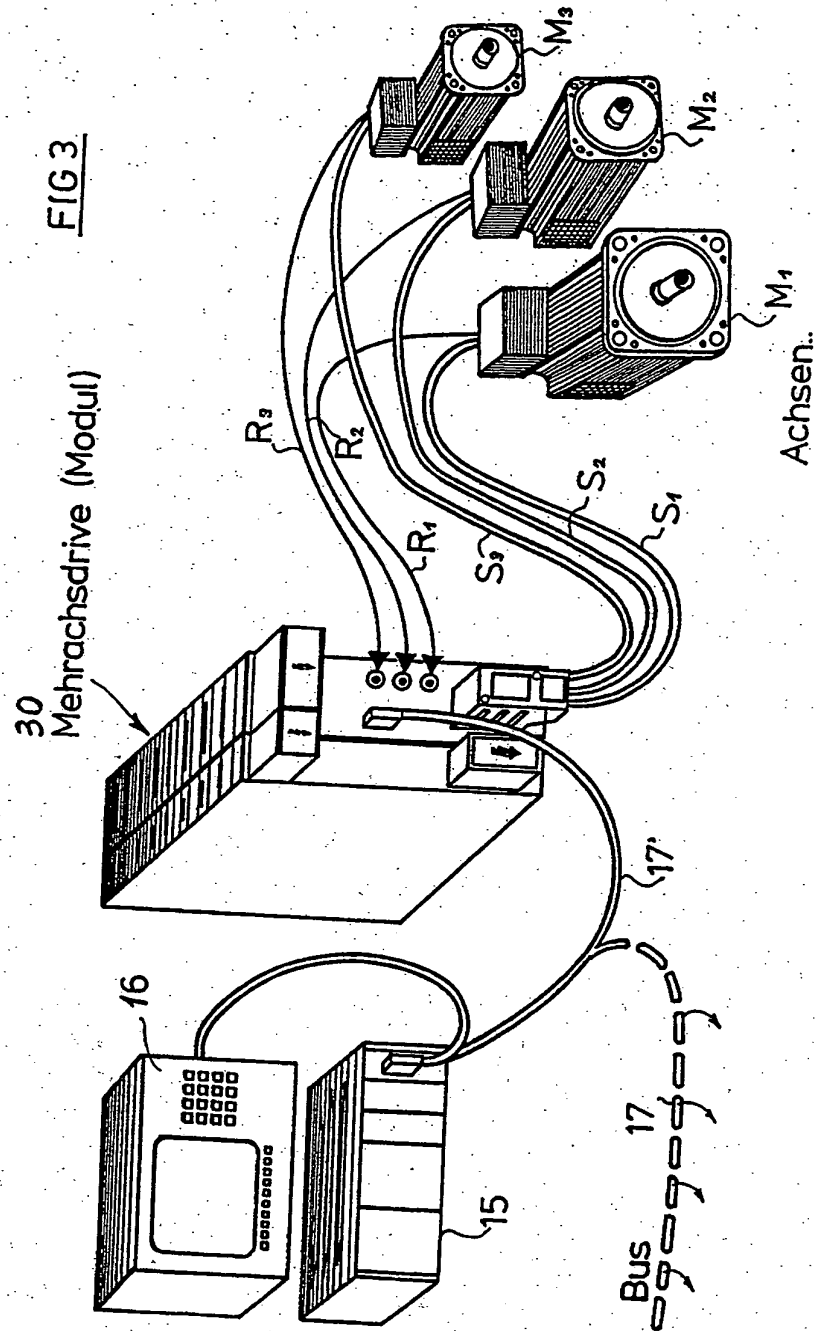
#### Patentansprüche

1. Regelantrieb für mehrere Regelgrößen einer elektromotorisch angetriebenen Achse (M1; M2; M3) von Maschinen, insbesondere Spritzgießmaschinen, der eine Steuer- und Regelvorrichtung mit einem internen Signalrechner (20) aufweist, welcher die folgenden Funktionen zum Steuern und/oder Regeln der Regelgrößen umfaßt; Phasenwinkelsteller ( $\phi$ ), Strom- (I) und Geschwindigkeitsregler (V), dadurch gekennzeichnet, daß ein getrennt anbringbarer, von einem etwaigen Maschinenrechner (15, 16) unabhängiger Mehrgrößen-Regler (25) zum autonomen Steuern oder Regeln der Regelgrößen vorgesehen ist, der neben dem Signalrechner (20) einen diesem übergeordneten Prozeßrechner (22) aufweist, der zur verzögerungsfreien, selektiven Steuerung oder Regelung der Regelgrößen ausgelegt ist und seine notwendigen Informationen aus einem im Mehrgrößen-Regler (25) vorgesehenen Speicher (24) bezieht.
2. Regelantrieb nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch ein Modul (30), welches neben mehreren Signalrechnern (20) den Prozeßrechner (22) aufweist, der zur verzögerungsfreien, gleichzeitigen Steuerung oder Regelung mehrerer Achsen (M1, M2, M3) ausgelegt ist.
3. Regelantrieb nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Mehrgrößenregler (25) als Kaskadenregler ausgebildet ist.
4. Regelantrieb nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß er eine Schnittstelle zu einem Datenbus (17) oder direkt zum Maschinenrechner (15, 16) aufweist.
5. Regelantrieb nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Arbeitsphasen mit unterschiedlichen Sollwerten oder Zielgrößen im Mehrgrößen-Regler (25) festlegbar sind.
6. Regelantrieb nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Stellsignal bei kleinen Regelabweichungen eine lineare und bei großen Regelabweichungen eine Wurzelfunktion der Regelabweichung ist.
7. Regelantrieb nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der elektromotorische Antrieb (1) ein permanent erregter Servomotor, ein vektoriell geregelter Asynchronmotor, ein geregelter Gleichstrommotor, ein bürstenloser DC-Motor oder ein geschalteter Reluctance-Motor ist.
8. Regelantrieb nach einem der Ansprüche 2—7, dadurch gekennzeichnet, daß der Prozeßrechner (22) für drei oder mehr Achsen ausgelegt ist.
9. Regelantrieb nach einem der Ansprüche 2—8, dadurch gekennzeichnet, daß bei Verarbeitungsmaschinen mit vier und mehr Achsen zwei oder mehrere Module (30) vorgesehen sind, die über Start- und Ablaufprogramme koordiniert sind.
10. Regelantrieb nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß ein Modul (30) als übergeordnetes Modul die Start- und Ablaufprogramme beinhaltet.
11. Regelantrieb nach einem der Ansprüche 2—10, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest für einzelne Werte ein Sicherheitsgrenzband in einem Modul (30) festgelegt und seinem Prozeßrechner (22) als Teil eines Rezeptes oder eines Programmes zur Überwachung übermittelt wird.
12. Verwendung des Regelantriebes nach einem der vorstehenden Ansprüche für Druckgußmaschinen, Roboter, einschließlich Schweißroboter, Krane, Gieß- und Preßmaschinen, Textil- und Papierverarbeitungs- sowie Werkzeugmaschinen.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen







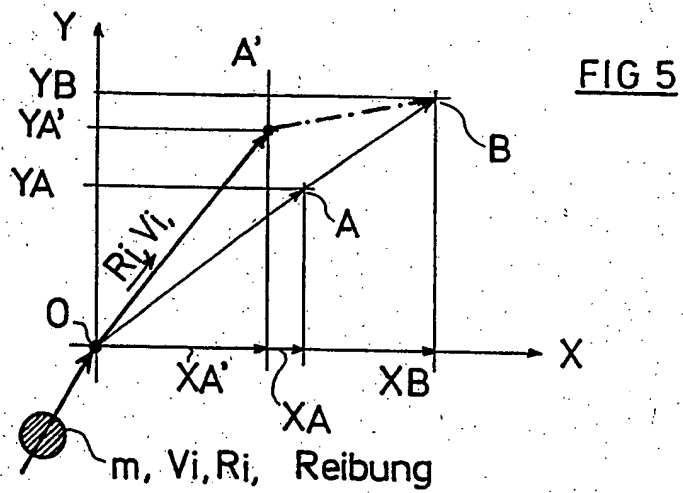
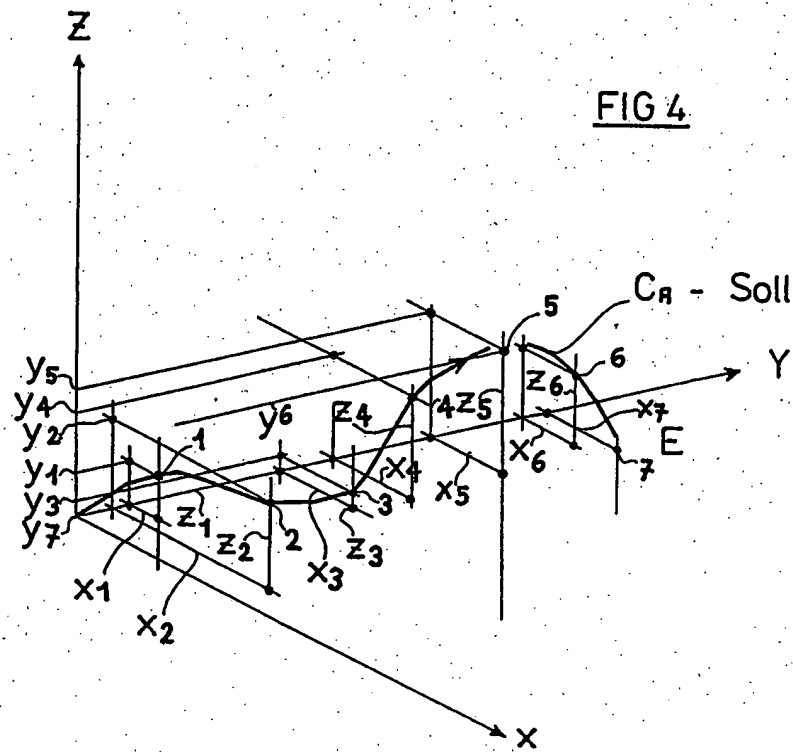


FIG 6

Verbesserte Lageregelung

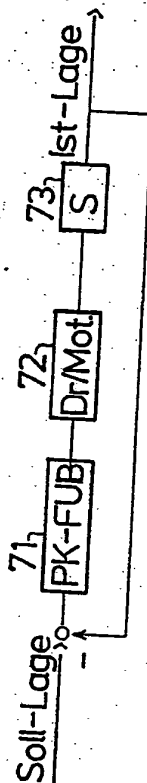


FIG 6a

Optimierte Kraftregelung

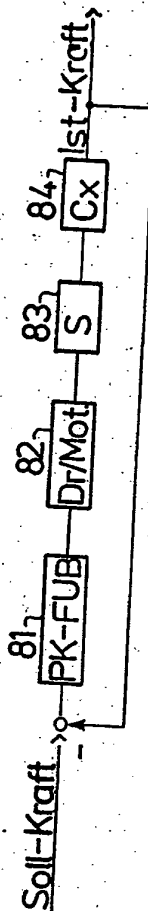


FIG 6b

Optimaler Mehrgrößen - Prozesskontroller

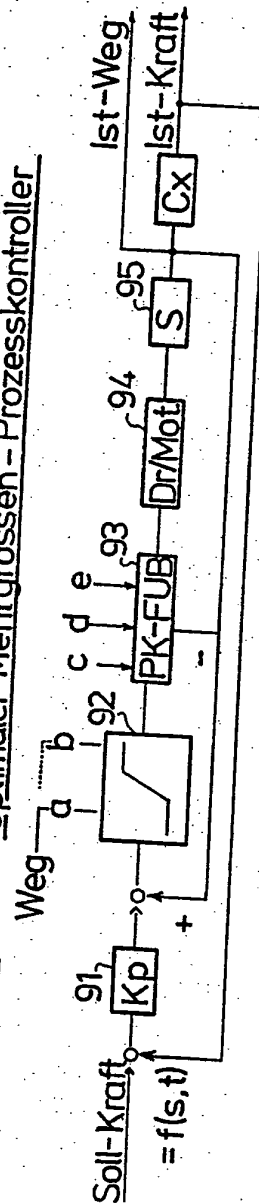


FIG 7 Statische  $p = f(v)$  Kennlinie

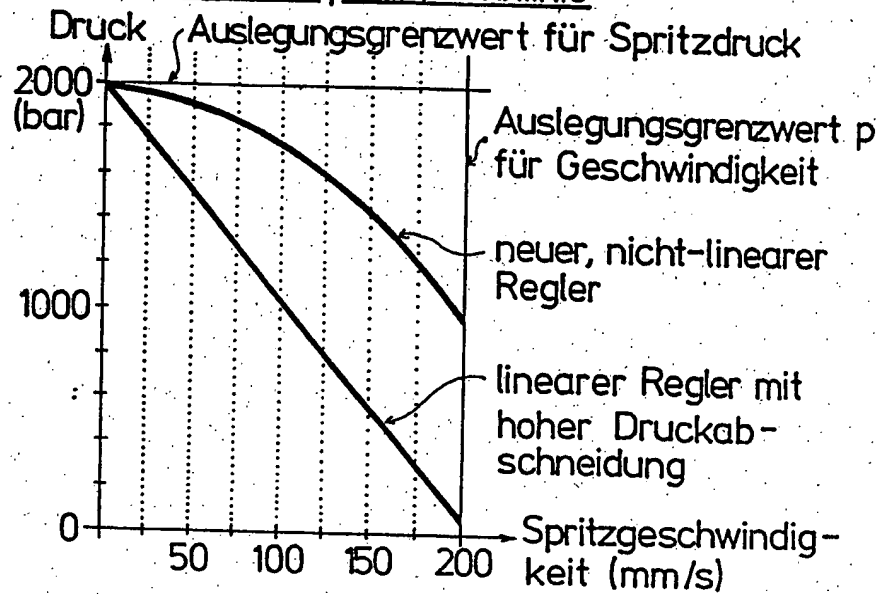


FIG 8 Beispiel für optimierten erfindungsgemässen Regler mit linear/parabolischer Funktion

